

УДК 621.9+536.75

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АДДИТИВНОГО И СУБТРАКТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Б.М. БАЗРОВ**

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*

**М.Л. ХЕЙФЕЦ**

*ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

**С.А. ЧИЖИК**

*Институт тепло- и массообмена им А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь*

*Проведен анализ состояния и перспектив развития технологического оборудования для субтрактивного и аддитивного компьютеризированного производства, позволивший показать новую парадигму его эволюции. Предложена диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства, представляющая собой конечный автомат, которая может использоваться как для построения 3D-принтера, осуществляющего «выращивание» изделия сложной формы и структуры, так и для аддитивного синтеза его композиционного материала.*

Исходными данными для проектирования технологического оборудования является техническое задание конкретного заказчика, содержащее:

1. Данные о материалах и готовых изделиях.
2. Производительность оборудования, характер и тип производства.
3. Уровень автоматизации и встраиваемость в современное производство.

Последовательность расчета технологического оборудования для традиционного субтрактивного производства включает укрупненные стадии:

1. Компоновка (выбор кинематической схемы).
2. Модульное построение (ограничительный набор агрегатов и узлов).
3. Расчеты статических упругих перемещений (выбор схемы и прочностные расчеты).
4. Динамические расчеты устойчивости движений системы и статических отклонений элементов (выбор схемы и динамические расчеты).
5. Тепловые расчеты (выбор термодинамической схемы и расчет температур).

6. Точностные расчеты (определение точности геометрических и кинематических связей с учетом деформации).

7. Расчеты надежности (определение надежности агрегатов и узлов, экономическое обоснование надежности).

8. *Анализ человеко-машинной системы* (охрана труда и техника безопасности).

Далее по стадиям производится расчет основных систем технологического оборудования: 1) несущих систем; 2) направляющих движений; 3) приводов движений и др.

Проектирование и расчет основных систем технологического оборудования производится по техническим требованиям к механическим агрегатам, технологической оснастке и средствам автоматизации; системам смазки, электрооборудованию и программируемым системам; системам диагностики, с учетом техники безопасности, эргономики и технологичности станка. Для этого в первую очередь строятся схемы (согласно нумерации стадий): кинематическая (1), прочностная (3), динамическая (4), термодинамическая (5), контакта и трения (6), изнашивания и надежности (7).

Построение ведется как с учетом ограничительного набора агрегатов и узлов – по модулям (2), так и на базе анализа человеко-машинной системы (8) в целом.

Однако, для компьютеризированного аддитивного производства, этих стадий и соответствующих им схем недостаточно. Сущность аддитивного производства заключается в послойном синтезе или «выращивании» изделий по «цифровым моделям» без использования формообразующей оснастки. Создание формы изделия происходит путем добавления материала, в отличие от традиционных технологий, основанных на удалении «лишнего» материала.

Различают две основные группы аддитивных методов:

1) с «предварительным формированием слоя» материала по технологиям *BD (Bed Deposition)*, подразумевающим наличие определенной платформы, на которой послойно «выращивается» материал и изделие;

2) «непосредственное осаждение слоя» материала на сложнопрофильную поверхность изделия по технологиям *DD (Direct Deposition)*.

В настоящее время методы аддитивного производства классифицируются следующим образом по стандарту ISO/ASTM 52900-15:

1. *Vat Photopolymerization* – фотополимеризация в емкости;

2. *Material Jetting* – разбрызгивание материала или струйные технологии;

3. *Material Extrusion* – выдавливание материала;
4. *Powder Bed Fusion* – плавление материала в заранее сформированном слое;
5. *Binder Jetting* – разбрызгивание связующего вещества;
6. *Sheet Lamination* – соединение листовых материалов;
7. *Directed Energy Deposition* – прямой подвод энергии непосредственно в место построения.

Классификации по принципам получения изделий без формообразующей оснастки соответствуют, согласно представленной последовательности, созданные уже более 30 лет назад «традиционные» методы:

1. *Stereolithography Application (SLA)* – стереолитография;
2. *Solid Ground Curing (SGC)* – послойное уплотнение материала;
3. *Fused Deposition Modeling (FDM)* – послойное экструдирование расплава;
4. *Selective Laser Sintering (SLS)* – селективное лазерное спекание;
5. *Direct Shell Part Creation (DSPC)* – прямое создание литейных форм;
6. *Laminated Object Manufacturing (LOM)* – послойное ламинирование из листового материала; а также другие методы, сегодня не столь распространенные в производстве.

Широко используемые в мировом производстве технологии послойного синтеза позволяют заключить, что наиболее перспективно применение новых аддитивных технологий создания слоев и формообразования изделий, использующих различные сочетания материалов и источников энергии. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру импульсов подачи энергии и материала.

Если рассматривать аддитивное технологическое оборудование с позиций компьютеризации производственной деятельности, то 3D-принтеры – печатающие машины, их узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Поэтому для моделирования 3D-печати и разработки технологического оборудования аддитивного производства прежде всего необходимо:

- 1) предложить *диаграмму связей* в процессах «выращивания» изделий, представляющую собой *конечный автомат*;
- 2) трансформировать в *клеточную машину* с ограниченным числом состояний и правил перехода предложенный конечный автомат;

3) сформировать *конфигурации из клеток* конечного блока *клеточных машин* для различных процессов «выращивания» изделий;

4) рассмотреть *мозаичные структуры*, формируемые различными конфигурациями клеток, в зависимости от их состояний и *правил перехода*.

Диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства представляет собой конечный автомат. Приняв за функциональные состояния технологической системы различные способы наращивания слоев, строится кинетическая схема конечного автомата при: I) прямом получении деталей; II) послойном синтезе; III) быстром прототипировании; IV) формировании трехмерных объектов.

Представив блок-схемами совокупности режимов для каждого функционального состояния, получают алгоритмические схемы состояний технологической среды. После соединения алгоритмических схем состояний строится клеточная машина технологической среды при «выращивании» изделий.

Рассматривая взаимосвязи состояний конечного автомата, получают граф состояний клетки-элемента технологической среды.

Конфигурации клеточных машин, отражающие их потактовые возбуждения, представленные графами состояний клеточных автоматов технологической среды, описывают поведение элементов мозаичной структуры при «выращивании» изделий.

В результате граф состояний автомата может быть эффективно использован для описания функциональных состояний элементарных клеток технологической среды.

Таким образом, при проектировании технологии аддитивного синтеза применяются как методы формообразования деталей из композиционных материалов, использующие потоки энергии и компонентов материала, так и методы автоматизации и управления процессами оперативного макетирования и производства изделий.



## Проектирование комплексов технологического оборудования аддитивного и субтрактивного производства

Базров Борис Мухтарбекович,  
Хейфец Михаил Львович,  
Чижик Сергей Антонович,

ИМАШ РАН,  
ИПФ НАН Беларуси,  
ИТМО НАН Беларуси

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ  
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ОАО «НПО «ЦЕНТР  
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРК  
ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

## **Инновационные технологии в машиностроении**

Электронный сборник материалов международной  
научно-технической конференции,  
посвященной 50-летию машиностроительных специальностей  
и 15-летию научно-технологического парка  
Полоцкого государственного университета  
(Новополоцк, 21-22 апреля 2020 г.)



Под редакцией  
чл.-корр. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега;  
д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2020

УДК 621(082)

*Редакционная коллегия:*

Н. Н. Попок (председатель), В. П. Иванов (зам. председателя),  
Р. С. Хмельницкий (отв. Секретарь), А.В. Дудан, В. А. Данилов, Е.В. Бритик

***Инновационные технологии в машиностроении*** [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21-22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. ред. В. К. Шелега; Н. Н. Попок. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-691-7.

Отражены современное состояние и направления развития технологии и оборудования механической и физико-технической обработки; рассмотрены вопросы создания современных материалов, изготовления, восстановления и упрочнения деталей машин, автоматизации производства, эксплуатации и модернизации автомобилей и других машин.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов технических специальностей учреждений образования.

Прилагаются [титulyные листы презентаций докладов](#) участников конференции.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3141815008 от 28.03.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 59-95-53, e-mail: n.popok@psu.by

**№ госрегистрации 3141815008**

**ISBN 978-985-531-691-7**

© Полоцкий государственный университет, 2020

Для создания текстового электронного издания «Инновационный технологии в машиностроении» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Компьютерный дизайн *Е. А. Балабуевой*  
Техническое редактирование и верстка *И. Н. Чапкевич*

---

Подписано к использованию 23.04.2020.  
Объем издания: 10,9 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 264.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>